

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONTENIDO DE ÓXIDOS PRESENTES EN
LAS CENIZAS DE LODOS DE PTAP Y EL CEMENTO PORTLAND TIPO UNO.

NEMESIO DAZA MARQUEZ

ADRIANA MEDINA SANCHEZ

DIRECTOR

YOLEIMY AVILA PEREIRA, M. Sc.

CODIRECTOR

FABRICIO DEPAOLI

PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL EN INGENIERIA

CIVIL

UNIVERSIDAD DE LA COSTA

FACULTAD DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

BARRANQUILLA

2018

NOTA DE ACEPTACIÓN

Claudia Ines Ayala Rueda

PRESIDENTE DEL JURADO

Gerald Leonidas Mestra Rodriguez

JURADO

Claudia Natali Velosa Pérez

JURADO

Barranquilla 19 Enero 2018

Dedicatoria

Primeramente a la energía superior, Adonái, quien me ha llevado por el mejor camino, para llevar un proceso de paz y sanidad a mi alma

Dedico este logro a mi familia, por su apoyo incondicional y constante, mi madre con su carisma y gran amor incomparable, mi pareja con su empuje, carácter y hacer parte de este proyecto de vida, mi hijo por ser mi motor principal para cada paso que doy, mi maestro y coach JSPH por ser un segundo padre para mí y por último y no menos importante a mi papá quien está en otra dimensión junto a Dios viendo cada uno de los logros que obtengo gracias al esfuerzo que él alguna vez hizo.

Gracias a mis profesores, colegas, compañeros y amigos en la Universidad de la Costa, por brindarme un poco de su conocimiento, tiempo y dedicación, quienes día a día aportan grandes cosas para mi vida como profesional y como persona.

Nemesio Miguel Daza Marquez.

Dedico este trabajo investigativo inicialmente a Dios, por llenarme de fortaleza, sabiduría e iluminarme en los momentos más difíciles, a mis padres, quienes me han impulsado y me han brindado su apoyo incondicional, a mi familia que ha sido un pilar fundamental y a mi hija Gabriela que es mi motivación día a día, por quien vivo para hacer feliz.

Finalmente mi dedicatoria va para todas y cada una de esas personas que pusieron su granito de arena en mi formación como Ingeniera Civil en la Universidad de la Costa CUC.

Adriana Cristina Medina Sánchez

Agradecimientos

A la Energía superior, Dios todo poderoso, por permitirnos trabajar en este proyecto, darnos sabiduría, entendimiento, y disciplina para alcanzar esta meta en nuestras vidas.

A la Ing. Yoleimy Ávila, directora del proyecto de grado, por su dedicación, orientación y asesoramiento en la elaboración del proyecto.

Al Ing. Ferney Bohórquez González por su disponibilidad, apoyo y colaboración prestada.

Al Mag. Alex Castellar, por su orientación, apoyo y colaboración constante.

A los estudiantes Steven Restrepo y Kevin Bohórquez estudiantes de Ingeniería Civil y química de la Universidad de la costa y la Universidad del atlántico respectivamente, por su colaboración brindada en el desarrollo estadístico del proyecto.

A la empresa Saybolt de Colombia, por el uso de sus instalaciones para llevar a cabo los ensayos experimentales.

Contenido	
	Pág.
Resumen.	10
Abstract.	11
Introducción	12
1. Planteamiento del problema.	13
2. Objetivos.	14
2.1. Objetivo general	14
2.2. Objetivo específico	14
3. Marco referencial.	15
3.1. Marco teórico.	15
3.1.1. Tratamiento de agua potable	15
3.1.1.1. Potabilización	15
3.1.1.2. Plantas de tratamiento de agua potable en Colombia	15
3.1.1.3. Captación de agua	15
3.1.1.4. Captación de agua superficial	16
3.1.1.5. Proceso de potabilización	16
3.1.2. Tratamiento y manejo de lodos producto de potabilización	17
3.1.2.1. Origen y efectos negativos de los lodos	17
3.1.2.2. Características físicas y químicas de los lodos	18

3.1.3.	Reutilización de los lodos en la industria de la construcción como material cementante suplementario	19
3.1.4.	Cemento	19
3.1.4.1.	Clasificación del cemento según su tipo	19
3.1.4.2.	Proceso de fabricación del cemento portland tipo I	19
3.1.5.	Arcillas	21
3.1.5.1.	Clasificación de las arcillas	21
3.1.5.2.	Clasificación según el punto de vista geológico.	21
3.1.5.3.	Clasificación según el grupo mineralógico dominante.	22
3.1.6.	Hipótesis estadística	22
3.1.7.	Pruebas paramétricas	23
3.1.8.	Distribución normal	23
3.1.9.	Test de Normalidad	23
3.1.10.	Pruebas no paramétricas	24
3.1.11.	Prueba de Kruskal Wallis	24
3.1.12.	Diagrama de caja y bigotes	25
3.2.	Estado del arte.	25
3.3.	Área de estudio.	29
3.3.1.	Planta de tratamiento de agua potable de triple A.	29
3.3.2.	Descripción de los procesos de potabilización.	29

ANALISIS COMPARATIVO DEL CONTENIDO DE OXIDOS.	7
4. Metodología.	32
4.1. Primera fase: toma de muestra y secado solar.	32
4.2. Segunda fase: molienda y calcinación del lodo.	32
4.3. Tercera fase: análisis por fluorescencia de rayos X.	33
4.4. Cuarta fase: análisis comparativo de la composición química de las cenizas de los lodos vs el cemento portland tipo I.	35
5. Resultados y discusión.	36
5.1. Fluorescencia de rayos x (FRX).	36
5.2. Pruebas estadísticas y discusión.	38
5.2. Datos atípicos e incertidumbre.	59
5.3. Eficiencia de los lodos con base seca.	63
Conclusión.	66
Recomendaciones.	67
6. Bibliografía.	68

Lista de tablas y figuras.

Tablas.

	Pág.
Tabla 1.....	37
Tabla 2.....	43
Tabla 3.....	45
<i>Tabla 4.</i>	47
Tabla 5.....	50
Tabla 6.....	52
Tabla 7.....	55
Tabla 8.....	60
Tabla 9.....	62
Tabla 10.....	63
Tabla 11.....	64

Figuras.

	Pág.
Figura 1	33
Figura 2.	34
Figura 3	34
Figura 4.	39
Figura 5.	40
Figura 6.	41
Figura 7.	42
Figura 8.	44
Figura 9.	44
Figura 10.	46
Figura 11.	46
Figura 12.	48
Figura 13.	49
Figura 14	51
Figura 15	51
Figura 16	53
Figura 17.	54
Figura 18.	56
<i>Figura 19.</i>	56
Figura 20.	60

Resumen

La contaminación de fuentes hídricas, causada por el vertimiento de lodos que se generan en el proceso de potabilización del agua, representa un serio problema ambiental debido a su composición química y a su descargue sobre los cauces de los ríos sin ningún tipo de tratamiento previo, afectando de manera negativa al medio ambiente y a los habitantes de la zona. El presente proyecto tiene como objetivo principal analizar el compuesto de químicos presentes en las cenizas de los lodos de las PTAP en relación al cemento Portland tipo I; con la finalidad de evaluar si las cenizas de dichos lodos funcionan como material cementante suplementario al cemento Portland tipo I.

Palabras clave: Vertimiento de lodos, potabilización del agua, problema ambiental, Cenizas de lodo, material cementante.

Abstract

The contamination of water sources, is caused by the sludge that is generated in the water purification process, represents a serious environmental problem due to its chemistry and discharge into the riverbeds in a negative way, to the environment and the inhabitants of the area. The main objective of this project is to analyze the chemical compound presented in the ashes of the PTAP lots in relation to Portland cement type I; with the purpose of evaluating if the ashes of said sludge function as a supplementary cementing material to Portland type I cement.

Keywords: Sludge discharge, water purification, environmental problem, mud ash, cementitious material.

Introducción

La contaminación ambiental es un problema mundial que afecta a todos, esta es causada en su mayoría por desechos inorgánicos que se alojan en el aire y en el agua que se consume. Diferentes tipos de industrias y empresas de servicios públicos son responsables de esta problemática. Como es el caso de los lodos producidos en las plantas de tratamiento de agua potable luego del proceso de sedimentación, los cuales terminan depositados en ríos contaminando el agua que es utilizada y consumida por las personas que viven en su alrededor. Estos lodos pueden ser estudiados y analizados por su composición química, para ser utilizados como material cementante suplementario en la mezcla de materiales para la construcción. Por lo que se procedió a realizar un análisis composicional mediante fluorescencia de rayos X, a la muestra de lodo cenizado a 600°C y a 800°C, este mismo análisis se le realizó a la muestra de cemento portland tipo I para determinar los óxidos presentes en ambos materiales.

El presente trabajo se llevó a cabo con la finalidad de determinar si los lodos residuales cenizados de la planta de tratamiento de agua potable ubicada en la ciudad de Barranquilla tienen potencial como remplazo del cemento portland tipo I.

1. Planteamiento del problema.

Como consecuencia de los procesos de tratamiento de agua potable, se generan lodos residuales. Su disposición final es un problema por sus características fisicoquímicas y microbiológicas que pueden tener efectos adversos sobre el medio ambiente y la salud humana. En el caso de los lodos de la planta de tratamiento de agua potable ubicado en la ciudad de Barranquilla, tienen como disposición final el vertimiento al río Magdalena, sin ningún tratamiento previo a este residuo. Una alternativa para la eliminación de los lodos residuales es considerar el uso de este subproducto en materiales de construcción, más específicamente como material cementante suplementario. Investigaciones anteriores han demostrado que el uso de lodos residuales como agregado en materiales de construcción, permite reducir costos de producción y, en la mayoría de los casos, mejorar la calidad de materiales de construcción convencionales. En consecuencia para determinar si la solución planteada es totalmente factible se deben realizar ciertos análisis composicional mediante la fluorescencia de rayos X cuyos resultados se espera que estén dentro de los parámetros establecidos. De esta manera el problema se establece en una sola dirección: encontrar si, los lodos residuales tienen potencial como reemplazo del cemento Portland tipo I en la elaboración de morteros y/o concretos.

2. Objetivos.

2.1. Objetivo general

Realizar un análisis comparativo del contenido de óxidos presentes en las cenizas de lodo de PTAP en relación a los óxidos presentes en el cemento Portland tipo I.

2.2. Objetivo específico

- I. Determinar mediante un análisis por fluorescencia de rayos X las concentraciones de óxidos presentes en las muestras de cenizas de lodo obtenido de una PTAP en la ciudad Barranquilla.
- II. Comparar la composición química de las cenizas de los lodos Vs. el cemento Portland tipo I, mediante un análisis estadístico inferencial.
- III. Establecer la eficiencia del lodo generado y la ceniza producida
- IV. Definir si las cenizas de lodos de PTAP tienen potencial como material cementante suplementario del cemento Portland tipo I, basado en los análisis estadísticos aplicados a los resultados del FRX.

3. Marco referencial.

3.1. Marco teórico

3.1.1. Tratamiento de agua potable

3.1.1.1. Potabilización

La potabilización consiste en la eliminación de compuestos e impurezas presentes en el agua cruda proveniente de ríos (Idrovo, 2010, p. 1), es por ello que necesita un tratamiento especial y de esta manera poner a disposición de los consumidores el abastecimiento satisfactorio de la misma, haciendo todo lo posible para obtener la mejor calidad que la tecnología permita (Bermeo y Idrovo, 2014, p. 20). Con base en lo anterior se deben seguir los lineamientos dictaminados por las normas técnicas establecidas en el lugar en el que se vaya a llevar a cabo este procedimiento, que por lo general cuentan con la implementación de coagulantes, floculantes, filtraciones y desinfección del agua captada (Idrovo, 2010, p. 1).

3.1.1.2. Plantas de tratamiento de agua potable en Colombia

Las plantas para el tratamiento de agua potable (PTAP) son diseñadas y construidas con el fin de abastecer de agua potable a determinada población, de acuerdo al nivel de complejidad de la misma según el Título A del RAS 2000, Capítulo A.2..

3.1.1.3. Captación de agua

Según Lopez-Cualla (1997), la captación de agua es:

El primer proceso que se debe tener en cuenta para hablar de abastecimiento de agua, es la captación, inicialmente se debe determinar el tipo de fuente y proceder a diseñar el tipo de estructura conveniente según sea el caso (López ,1997, p. 22).

El agua que ingresa a la planta debe ser captada desde una fuente ya sea superficial o subterránea para su tratamiento, teniendo en cuenta su caudal de alimentación (RAS, 2000, Título B.).

3.1.1.4. Captación de agua superficial

Según Lopez-Cualla (1997):

La captación de agua superficial también se conoce como bocatoma, refiriéndose a la toma de agua en ríos, (...). Estas se deben ubicar en tramos rectos o en la parte exterior de una curva, ya que en el interior de las curvas se suelen depositar materiales en época de invierno a causa de las crecientes y en época de verano podría quedar seca.

(López, 1997, p. 87)

3.1.1.5. Proceso de potabilización

Para proceder a tratar y potabilizar el agua se deben seguir estrictamente las indicaciones descritas por el RAS 2000 Título A Capítulo 11.2.

Se identifica el tipo de fuente hídrica obteniendo sus características físicas y químicas, catalogándolas como: Aceptables, regular, deficiente y muy deficiente.

Posteriormente, se estudia la tratabilidad de la fuente determinando la calidad del agua en diferentes periodos. Así se inicia el proceso de desarenación, coagulación, floculación; sedimentación en el cual los lodos quedan en el fondo del sedimentador, filtración y desinfección haciendo uso de métodos como la cloración, ozonificación y con dióxido de cloro (RAS 2000, Cap. A.11.2.3.).

3.1.2. Tratamiento y manejo de lodos producto de potabilización

El RAS 2000 expone alternativas para el tratamiento y manejo de lodos que se originan en los procesos de sedimentación y filtración, producto de la operación de plantas de potabilización. Entre los que se encuentra la reintegración de los mismo a corrientes de agua o vertimiento en alcantarilla, de no poderse lo anterior, se deben trasladar a lagunas de acumulación donde son decantados y se elimina el agua de arrastre hasta dejarlos semisolidificado (RAS 2000, Cap. A.11.2.14.).

Otra alternativa es concentrar el lodo, llevarlo a lagunas de secado para su solidificación y depositarlo en el sitio acordado, también se podría secar mediante sistemas mecánicos, extrayendo las pasta y trasladarla hasta el lugar de acopio (RAS 2000, A.11.2.14.).

En caso de realizar la descarga de lodos en un cuerpo de agua, se debe cumplir la normativa que establece el decreto no. 1287 del 10 de Julio de 2014 (RAS 2000, A.11.2.14.).

3.1.2.1. Origen y efectos negativos de los lodos

Tomando como apoyo la tesis de Borquez (2017), se encuentra que el agua captada para el proceso de potabilización, contiene una serie partículas en suspensión. Dentro de los que se encuentran arenas, limos orgánicos en solución, iones que causan dureza, turbiedad, color y otras sustancias que afectan la calidad del agua (Raigosa, 2012). Estos sólidos son removidos con la ayuda de coagulantes y floculantes que permiten el aglutinamiento de dichos sólidos de modo que por su propio peso y acción de la gravedad, puedan precipitarse en los sedimentadores en el proceso de sedimentación (Rocha, E., 2009). Esto sedimentos o residuos reciben el nombre de

lodos. Según el Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico, los lodos que se producen en los filtros constituyen entre el 30 y el 40% de los sólidos totales y los lodos que se producen en los sedimentadores constituyen entre el 60 y el 70% de los sólidos totales (RAS 2000, Título B). Otros autores indican que dichos residuos corresponden al 0,5-1% del total de agua tratada (Sandoval, Motellano, Martín, Sánchez, Santana, y Morán, 2002, p. 2).

En la mayoría de los casos los lodos son regresados sin ningún tipo de tratamiento a las fuentes hídricas. El impacto ambiental o efectos negativos que se generan dependen principalmente del tipo de tratamiento que se lleva a cabo. Gallo y Uribe (2003) indican que:

La toxicidad potencial de estaciones de tratamiento de agua depende de factores como: características del agua cruda, productos químicos usados en el tratamiento, reacciones químicas ocurridas durante el proceso, forma de remoción y tiempo de retención de los residuos en los sedimentadores, características hidráulicas, físicas, químicas y biológicas del cuerpo receptor, etc. (Gallo y Uribe, 2003, p. 20)

3.1.2.2. Características físicas y químicas de los lodos

Los lodos son sólidos con humedad variable, provenientes del lavado de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP), sometidos a un proceso de estabilización. Estos se componen principalmente de elementos presentes en el agua cruda (Arena, arcillas, entre otros) que son retenidos en decantadores y filtros a causa de procesos mecánicos (oxidación, coagulación y precipitación) y químicos al aplicar

coagulantes, compuesto por óxidos e hidróxidos, y reactivos como cal, carbón y/o permanganato. (Perilla, 2005, p. 8)

3.1.3. Reutilización de los lodos en la industria de la construcción como material cementante suplementario

El sector de la construcción encuentra en los lodos, una alternativa para la producción de elementos estructurales y no estructurales. Estudiando la posibilidad de incorporar estos lodos en la fabricación de cemento portland por su alto contenido de alúmina y hierro (Perilla, 2005, p. 2)

3.1.4. Cemento

Es un material de construcción con grandes propiedades conglomerantes, por lo que se ha hecho indispensable en la ejecución de obras civiles. Este es producto de la calcinación y molienda de la roca caliza y minerales que al ser mezclado con agua reacciona de tal manera que fragua y se endurece (Sanjuán y Chinchón, 2014, p. 11).

3.1.4.1. Clasificación del cemento según su tipo

En la industria, el cemento se clasifica según su clase o categoría de resistencia, tipo o propiedades especiales más importantes, según su tipo encontramos el cemento Portland (tipo I- CEM I), cemento Portland con adiciones (tipo II- CEM II), cemento Portland con escorias de horno alto (tipo III-CEMIII), cemento puzolanico (tipo IV-CEM IV) y cemento compuesto (tipo V-CEM V) (Blanco, 2013, p. 1, 2).

3.1.4.2. Proceso de fabricación del cemento portland tipo I

El cemento portland tipo I se caracteriza por estar compuesto en un 95% - 100% de Clinker, el cual se origina de su proceso de fabricación al interior del horno (Blanco F., 2013, p. 4).

Inicialmente en el proceso de fabricación del cemento, se extrae de canteras rocas compuestas de Carbonato de Calcio (CaCO_3) (caliza, margo o creta); Sílice, óxido de hierro y alúmina (arena, pizarra, arcilla, entre otras) También se puede emplear subproductos y residuos como sustitutos parciales de algunos de las materias primas naturales (Anónimo, 2005, p. 1).

En silos o tolvas se puede almacenar la materia prima en pequeñas cantidades. Para el proceso de homogenización se realizan dosificaciones controladas en el proceso de molienda obteniendo el crudo, controlando su composición química y adecuada finura, para un óptimo funcionamiento del horno (Sanjuán y Chinchón, 2014, p. 49). El crudo ingresa al horno a una temperatura de 900°C descomponiendo el carbonato cálcico (CaCO_3) generando óxido cálcico (CaO) y liberando dióxido de carbono (CO_2) (Sanjuán y Chinchón, 2014, p. 53).

Se incrementa la temperatura del horno, al llegar a los 1.400°C – 1.500°C el óxido de calcio reacciona con sílice, alúmina y óxido de hierro produciendo los minerales de Clinker (Sanjuán y Chinchón, 2014, p. 54), constituido mínimo por 2/3 de masas de silicatos (Belita: C_2S silicato dicálcico y Alita: C_3S silicato tricalcico) de calcio, además de aluminatos (Aluminato: C_3A aluminato tricalcico) y ferritos (C_4AF ferro aluminato de calcio) responsable de las propiedades hidráulicas del cemento. El Óxido de Magnesio (MgO) debe ser menor o igual que el 5% en masa y la relación en masa de $\text{CaO}/(\text{SiO}_2)$ debe ser mayor o igual a 2 (Blanco F., 2013, p. 7).

El clinker es enfriado a temperaturas entre 100°C - 200°C , jugando esta un papel fundamental sus las propiedades, teniendo en cuenta que la estructura de los

minerales del clinker puede ser diferente según la velocidad de la pérdida de calor, cambiando su morfología y composición química (Astreewa, 1956, p. 21)

El Clinker es molido en dos etapas, posteriormente se le adiciona yeso para incrementar el tiempo de fraguada, y es así como finalmente se obtiene el cemento. (Latorre, 2008, p. 7.)

3.1.5. Arcillas

Son sedimentos o depósitos minerales compuestos por silicatos complejos hidratados de aluminio, formados por partículas pequeñas en la que sus compuestos se organizan de manera laminar (Angelone, 2007, p. 6).

Las arcillas al ser humedecidas presentan un comportamiento plástico, mientras que secas son duras y quebradizas. Estas son producto del interperismo de rocas, es decir se originan de la alteración hidrotermal de la roca, expuesta a presiones, temperatura, acidez, entre otras. Formándose bajo la superficie, hipogénicas o en la superficie, epigenicas. (De Pablo, 1964, p. 49).

3.1.5.1. Clasificación de las arcillas

La naturaleza de estas y su proceso de alteración de la roca original, determinan la estructura y composición mineralógica de las mismas (De Pablo, 1964, 51).

3.1.5.2. Clasificación según el punto de vista geológico.

Se encuentran las primarias que permanecieron en el mismo lugar de formación y por lo general son Hipogénicas. Y las secundarias que fueron movidas a lugares diferentes al de su origen, por lo que encontramos las arcillas fluviales depositadas por ríos, arcillas lacustres asentadas en lagos, arcillas marinas por mares, arcillas deltas por diques y las arcillas de glaciares (De Pablo, 1964, p. 51).

3.1.5.3. Clasificación según el grupo mineralógico dominante.

Para esta clasificación se determinan 3 grupos, las arcillas Caolinitas que poseen fuerte enlace de hidrógeno, alta permeabilidad, baja absorción y baja susceptibilidad a la retracción y expansión. Las arcillas Illitas presentan las mismas características que las Caolinitas, con la diferencia que su enlace fuerte iónico es de átomos de potasio (Angelone, 2007, p. 11, 12).

Por último encontramos las arcillas Montmorillonitas que poseen enlace débil de moléculas de agua absorbida e iones metálicos, baja permeabilidad, alta absorción y baja susceptibilidad a la retracción y expansión (Angelone, 2007, p. 13).

3.1.6. Hipótesis estadística

Es una conjetura o suposición con relación a un conjunto de datos o población para de llegar a una conclusión luego de realizar un análisis profundo. Se aclara que en ocasiones no se sabe con certeza absoluta su veracidad o falsedad, aunque es posible saberlo si se evalúa toda la población (Walpole, Myers, Myers y Ye, 2012, p. 319).

La prueba de hipótesis parte de la hipótesis nula denominada H_0 y la hipótesis alternativa denominada H_1 , en la que H_0 es la hipótesis principal que se pretende probar y H_1 es la que se opone, rechaza o anula a H_0 , siendo su complemento. Esta se implementa con el fin de llegar a una de las dos conclusiones posibles: Rechazar H_0 a favor de H_1 o no rechazar H_0 , lo que no significa aceptar a cabalidad H_0 , estando abiertos a una nueva idea, suposición o conjetura si la evidencia con relación a los datos lo permite (Walpole, Myers, Myers y Ye, 2012, p. 320).

3.1.7. Pruebas paramétricas

Son las pruebas que se realizan a un grupo de datos o población que se rigen y cumplen con una condición o supuesto como la igualdad de varianza, distribución normal de los datos, independencia de las observaciones, entre otros. En caso de no cumplirse, se recurre a pruebas no paramétricas (Moral, 2012, p. 166).

3.1.8. Distribución normal

También llamada distribución Gaussiana, es un tipo de distribución de frecuencia o probabilidad indispensable en cualquier rama de la ciencia, la industria o el comercio (Reyes, 2007, p. 3).

Entre sus propiedades se encuentran que tiene $\mu = 0$ (media) y $\sigma = 1$ (desviación estándar). Su media, mediana y moda son iguales, a su vez se ubican en el pico; la distribución normal es simétrica, la mitad de curva tiene un área de 0.5; su forma y su posición dependen de los parámetros μ y σ , por lo que hay un número infinito de distribuciones normales, entre otras (Reyes, 2007, p. 4).

3.1.9. Test de Normalidad

El test o prueba de normalidad es una herramienta estadística que busca métodos confiables y eficientes para comprobar que una población pertenece a una distribución normal por medio de hipótesis (Isaza, Acevedo y Hernandez, 2015, p. 1). Entre los que se destacan el método de Kolmorov-Smirnov que compara las funciones de distribución de la muestra y la que se desea contrastar, se aplica a distribuciones continuas, los valores críticos están tabulados para distribuciones con parámetros especificados y algunas distribuciones con parámetros no especificados, consiste en la prueba de hipótesis nula, esta afirma que los datos si se ajustan a la

distribución de la función y la hipótesis alterna que no se ajusta (Kisbye, 2010, p. 2, 3). Y el contraste Shapiro-Wilk utilizado para poblaciones de máximo 50 datos, se debe calcular la media y la varianza muestral, y se ordenan observaciones de menor a mayor, los datos deben ser corregidos con coeficientes W tabuladas por Shapiro-Wilk, la hipótesis nula es rechazada cuando el estadístico W es menor que el valor crítico proporcionado por la tabla para el tamaño muestral y el nivel de significación dado según el Manual de SPSS de la Universidad de Barcelona (2008).

3.1.10. Pruebas no paramétricas

Es el método estadístico también llamado de libre distribución, utilizado para analizar el comportamiento de una población que no se encuentra normalmente distribuida o cuando se presenta una desviación de la normalidad en una muestra grande (Walpole, Myers, Myers y Ye, 2012).

Existen diferentes técnicas no paramétricas que se pueden implementar para justificar las condiciones de normalidad, de la que se puede escoger la más eficiente según sea el tipo de muestra y de medida, funcionando mejor en las cuantitativas (Walpole, Myers, Myers y Ye, 2012, p.655).

Para grandes desviaciones de la normalidad los métodos no paramétricos resultan más eficientes que los paramétricos (Walpole, Myers, Myers y Ye, 2012, p. 655).

3.1.11. Prueba de Kruskal Wallis

Es una de las pruebas que se emplea cuando los datos no tienen una distribución normal y/o no hay homogeneidad de varianzas o variable semicuantitativa y las muestras deben ser independientes y al azar. Se basa en rangos, no en parámetros de la muestra. La hipótesis alternativa establece que hay diferencia entre las medianas

de los grupos y la hipótesis nula dice que no existe diferencia en las medianas (Práctica de Ecología, 2004-2005, p. 16,17).

3.1.12. Diagrama de caja y bigotes

El diagrama de caja y bigotes es un tipo de gráfico estadístico que nos permite observar la distribución de cuartiles, medianas, ubicando valores mínimos y máximos, y valores atípicos. Su representación gráfica consta de una caja subdividida, dos prolongaciones llamadas bigotes y puntos y estrellas para identificar valores atípicos y extremos. (Grupo de innovación educativa, 2010, p.1)

3.2. Estado del arte

La organización Mundial de la Salud es uno de los principales entes que se encuentra luchando con las enfermedades transmitidas por el agua en la actualidad, como se expone en su artículo que promueve el tratamiento y almacenamiento seguro del agua doméstica (OMS, 2007) demostrando los efectos adversos producto de agua contaminada en los seres humanos, esta problemática afecta directamente a poblaciones vulnerables como se demuestra en el informe de 2015 del Programa Conjunto de Monitoreo (PCM, 2015) .

La comisión europea lidera labores de supervisión en los procesos de desechos producto del tratamiento de agua, con el fin de proteger las fuentes de abastecimiento y reducir los procesos agresivos de potabilización garantizando la pureza de la misma, por lo que se le dictaminan fuertes sanciones al país perteneciente a la Unión Europea que haga caso omiso a las indicaciones establecidas, como lo explica Falkenberg, K. en el artículo publicado “Proteger al medio ambiente de los vertidos de aguas residuales” (2010)

El comité Organizador de LATINOSAN 2007 desarrolló un informe titulado “Saneamiento para el desarrollo”, el cual evalúa el desarrollo y la condición de 21 países de América Latina y el Caribe, en materia de prestación de servicio de agua y saneamiento, abogando por los beneficios del buen manejo de desechos como lodos sépticos, aguas residuales y residuos sólidos.

Los lodos que se originan en la operación de plantas de tratamiento de agua potable son manejados y procesados, esto hace posible la reutilización de algunos de los elementos químicos que los componen, tales como los coagulantes, como lo indica Pelagia Research Library en su artículo “Recuperación de coagulantes de los lodos de obras de agua: revisión” (Mohammed & Lawal, 2011), tomando como guía documentos investigativos, presentando los diferentes métodos a los que se someten los lodos para la extracción de este elemento con el fin de reutilizarlo de manera positiva y reducir la contaminación que estos generan al ser desechados.

Diferentes sectores de la industria se benefician de estos residuos, que en lugar de ver un desecho tóxico, ven una materia prima, extrayendo elementos para reutilizar y/o para transformarlos en productos útiles con el fin de reducir el volumen de desechos producidos por la potabilización de agua y mitigar el impacto que tienen en el medio ambiente como lo indica el artículo “La oportunidad de reutilización para el lodo de tratamiento de agua” (Miroslav, 2008).

El ingeniero español Francisco Ramírez en su artículo titulado “Lodos producidos en el tratamiento del agua potable” (2008) desglosa cuidadosamente el proceso para tratar estos residuos e indicando las herramientas y equipos indispensables para el correcto tratamiento de los mismos.

Según el artículo “Tratabilidad de los lodos producidos en la potabilización del agua” del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, el mayor problema del manejo y tratamiento de los mismo, se debe a su alto contenido de agua y su baja capacidad de deshidratación a causa del uso de coagulantes como el sulfato de aluminio.

Es por esto que el sector de la construcción se encuentra a la vanguardia de la explotación de este residuo como recurso en la incorporación para fabricación y/o remplazo de materia prima en conglomerantes hidráulicos, como lo es el cemento, ya que se encuentran elementos químicos comunes entre estos dos materiales. La Comisión Europea en 2011 realizó un resumen titula “Prevención y Control Integrados de la Contaminación” en el que se muestra la similar composición de estos y se revelan las mejores técnicas para la fabricación de cemento, cal y óxido de magnesio con residuos como los lodos. A su vez el artículo “Investigación Experimental sobre Cenizas volantes y Lodos de Caliza en Mortero de Cemento” (Archaneswar, Dr. Rajasekhar & Dr. Sashidhar, 2016) muestra los diferentes diseños de mezcla utilizados en el que se alteró el porcentaje de cemento y se adiciono lodo, con el fin de observar el comportamiento de los mismos y determinar su resistencia a la compresión.

Por otra parte se ha encontrado en Japón que los lodos al someterse a un proceso de deshidratación y posteriormente a incineración, del que se obtiene un material que se puede incorporar a la fabricación del cemento Portland (Taruya, Okuno & Kanaya, 2002). Posteriormente Nuria Husillos Rodríguez en su tesis doctoral titulada “Valorización de residuos de estaciones de tratamiento de agua potable y residual en la industria del cemento” indica que al someter los lodos a un proceso de

incineración se obtiene un Clinker que es muy similar tanto en microestructura como en composición al producido por la roca caliza. La universidad Malaysia Pahang en el artículo publicado en 2016 “CARACTERIZACIÓN DE LA CENIZA DE LODOS EN MORTERO DE CEMENTO” proporciona un informe detallado de las pruebas a las que se somete el material para determinar su composición química como lo son los rayos X y su microestructura al ser incinerados a diferentes temperaturas.

A su vez, La Universidad de Medellín publicó el artículo “Tratamiento de los lodos generados en el proceso convencional de potabilización de Agua” (Gutiérrez, Ramírez, Rivas, Linares, Paredes, 2014) experimentando el proceso de extracción de elementos químicos como el aluminio que componen los lodos y sus propiedades físicas y químicas para su reutilización. Por otro lado, El ingeniero Jorge Perilla en su proyecto de grado “Estrategias para el reúso de los lodos en la zona dos de la Empresa de Acueducto y alcantarillado de Bogotá y plantas de tratamiento de aguas potables y residuales” (2015) mostrando su investigación de los diferentes usos que se le puede otorgar a estos en la industria, tales como en el tratamiento de lodos para uso de bio-insecticidas, uso de lodos para mampostería decorativa y para uso de la alúmina para la fabricación de cemento.

Finalmente en la ciudad de Barranquilla expertos elaboraron mortero incorporando lodo generado en plantas de agua potable a la mezcla, como se indica en el artículo “Materiales de construcción a base de lodos residuales” (Camargo L, Álvarez J y Guzmán A., 2012.) en el que evidencian que con la implementación de este, se presentaría gran reducción de costos de producción en la fabricación de cemento y/o mortero.

3.3. Área de estudio

3.3.1. Planta de tratamiento de agua potable de triple A.

La planta de agua potable de triple A se encuentra ubicada en el barrio las Flores de Barranquilla-Colombia. Esta planta fue diseñada y construida con el fin de abastecer de agua potable a todos los municipios pertenecientes al departamento del Atlántico. El agua que ingresa a la planta de tratamiento es captada del río Magdalena, la cual tienen como característica ser muy sobria, presenta alta alcalinidad y un alto contenido de contaminación. El caudal promedio que trata la planta es de 14300 m³/día, información que fue suministrada por la empresa triple A

3.3.2. Descripción de los procesos de potabilización.

El proceso de potabilización cuenta con las siguientes etapas según lo describe Bohórquez en su tesis:

- **Captación:** La ETAP (Estación de Tratamiento de Agua Potable) Ponedera toma el agua directamente del río Magdalena mediante un sistema de captación consistente de una barcaza flotante, equipada con 3 unidades de bombeo, a través del cual se abastece la planta de tratamiento con la que cuenta esta estación. Las bombas descargan a través de mangueras de 12'' a una tubería de 24'' en hierro dúctil que conduce el agua a la planta de tratamiento. Las motobombas de la barcaza son de tipo horizontal, que son utilizadas de acuerdo con la demanda en la planta de tratamiento y de la distribución.
- **Coagulación y floculación:** El coagulante, el ayudante de coagulación y el ayudante de floculación se aplican en la línea antes de que el agua

ingrese a la planta. El agua coagulada entra a la planta por una tubería de 18'' de diámetro a través de la válvula de entrada, y llega a una cámara de aquietamiento. Luego de esta cámara existe un canal distribuidor que conduce el agua cruda hacia dos módulos de floculación mecánicos con pantallas de flujo horizontal. La floculación se realiza en tres etapas por cada módulo. Los Productos químicos Utilizados son: Policloruro de Aluminio como coagulante, Superfloc 577-C como ayudante de coagulación y Superfloc 492 PWG como ayudante de floculación, las cantidades de estos productos dependen de la calidad de agua, para ello se hace una prueba de Jarras para verificar la dosificación de químicos.

- Sedimentación: La planta cuenta con dos módulos de sedimentación laminar acelerada con láminas inclinadas a 60 grados (60°). El tiempo de retención teórico en esta unidad es de 21,5 minutos. Cada sedimentador tiene 8 canaletas de recolección de agua sedimentada, las cuales vierten a un canal central que conduce el agua a las unidades de filtración. Los decantadores poseen dos válvulas de 12'' para drenajes de lodos por tolva y 4 válvulas de 6'' para drenajes de fondo.
- Filtración: Para el proceso de filtración, la planta cuenta con cuatro filtros rápidos de retrolavado con aire y agua. El lecho filtrante está constituido por arena con un tamaño efectivo de 0.9 mm y un coeficiente de uniformidad de 1,6. El agua a filtrar atraviesa el lecho

filtrante y se recoge en el falso fondo y por una tubería de 10'' se dirige al tanque de almacenamiento de esta planta.

- Desinfección: La desinfección ocurre a la entrada del agua al tanque y se utiliza para ello cloro Gaseoso. (Bohorquez, 2017)

4. Metodología

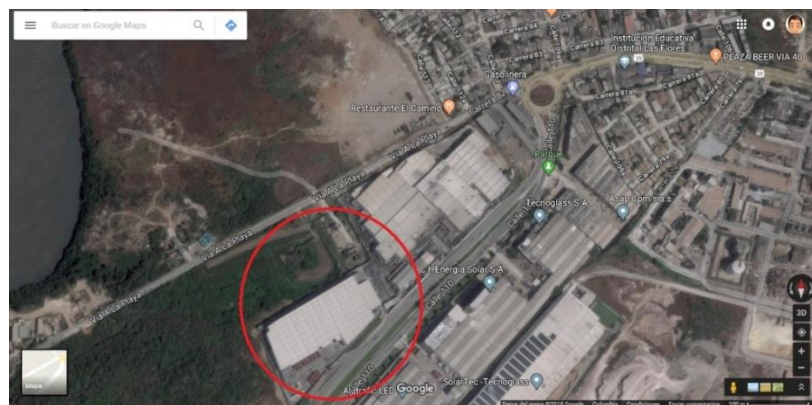
Se implementó la metodología experimental de análisis estadístico inferencial para la comparación de la composición química entre el cemento Portland y las cenizas de lodo de PTAP, con el fin de evaluar su posible incorporación o la sustitución del cemento en mezclas hidráulicas como el mortero y/o concreto; siguiendo de manera ordenada las fases que arrojaran los resultados para realizar los análisis respectivos.

4.1. Primera fase: toma de muestra y secado solar

Se tomaron muestras de lodos provenientes de la planta potabilizadora de agua, ubicada en la ciudad de Barranquilla, durante los meses de Agosto-Septiembre periodo de pocas precipitaciones, con el propósito de reducir cambios en las características fisicoquímicas de los lodos. Se obtuvo aproximadamente 45 Kg de lodo hidratado (base húmeda), conteniendo una humedad del 66,7%.

Las muestras de lodo se expusieron al sol a una temperatura ambiente promedio de 32°C durante 96 horas, tiempo que tardaron las muestras en secar. Finalmente se obtuvo 15 Kg de lodo seco y su rendimiento en masa fue de 33.3% (base seca).

Figura 1



Nota: Vista satelital de la PTAP las Flores, Barranquilla tomado de google Street view

4.2. Segunda fase: molienda y calcinación del lodo

La molienda del lodo seco se realizó en el equipo Holmes, modelo 201XL en malla No 8 y su calcinación en el horno de ceniza Carbolite modelo AAF 11/18 a temperaturas de 600 y 800 °C durante 3 horas, en los laboratorio de la empresa Saybolt de Colombia dedicada al control de calidad de minerales.

Figura 2



Nota: Ceniza de lodo a 600°C y 800°C

4.3. Tercera fase: análisis por fluorescencia de rayos X

El análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) se realizó en el laboratorio de la empresa Saybolt de Colombia para determinar la composición química del polvillo, que consiste en granos finos de material mono cristalino.

Inicialmente se pasaron las muestras calcinadas por el tamiza No. 200 (75µm) para separar partículas sólidas o elementos externos que pudiesen formar grumos al momento de mezclar. (Figura 3)

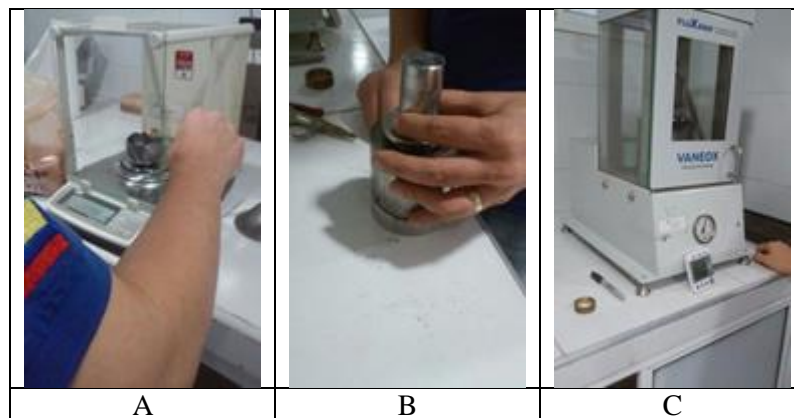
Figura 3.



Nota: A: Ceniza de lodo sin tamizar B: Ceniza de lodo tamizada

Posteriormente se elaboraron 30 pastillas para cada muestra, mezclándose 3g del material y 0,6 g de aglomerante pesados en la balanza analítica AND HR-120, el producto de esto se colocó en un anillo de bronce de 3 cm de diámetro y se compactó en el cilindro de compactación. Luego, se ubicó el anillo de cobre con el material compactado en la prensa, aplicándose una carga de 10 Bar (1 Ton) durante 30 segundos (Figura 4.C).

Figura 4



Nota: A: Balanza AND HR-120, B: Cilindro de compactación, C: Prensa

Finalmente, se efectuó el montaje de los 30 anillos compactados en la máquina de FRX Epsilon 3Lp Panalytical, para cada una de las muestras, lodo cenizado a 600°C, 800°C y cemento portland tipo I.

4.4. Cuarta fase: análisis comparativo de la composición química de las cenizas de los lodos vs el cemento portland tipo I

Se realizó un análisis completo de los resultados obtenidos en la fluorescencia de rayos X, aplicando estadística inferencial y las TIC`S que permitieron comparar la composición química de las cenizas de lodos de PTAP con las del cemento Portland tipo I.

5. Resultados y discusión

5.1. Fluorescencia de rayos X (FRX).

En la tabla 1, se observa el promedio de los datos obtenidos en la fluorescencia de rayos X (Ver anexos A, B y C) en el cual este análisis mostró que en relación al cemento, las cenizas de lodo contienen los seis óxidos exigidos por la NTC 321 para el cemento, que son: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO y SO_3 . Según la norma ASTM C618-05, se pueden clasificar las cenizas como material de puzolana con base al porcentaje representativo de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , los cuales para el lodo cenizado a 600°C y 800°C representan un 92.436% y 92.372% respectivamente. Por lo tanto se pueden clasificar como puzolana de clase N. Siendo el óxido de silicio el de mayor valor, este es uno de los componentes principales que interviene en la actividad puzolana de materiales cementantes cuya característica principal es la captación del agua como conglomerante.

Se observa que para los seis óxidos presentes en las cenizas de lodo contenidos en materiales cementantes, el SiO_2 , Fe_2O_3 , MgO y SO_3 , disminuyeron su contenido al aumentarse la temperatura, caso contrario con el Al_2O_3 y CaO , cuyo contenido aumentó.

Tabla 1.

A. Composición química de cemento y cenizas de lodo a 600°C y 800°C B.

Desviación estándar de los datos.

A. CONTENIDO DE ÓXIDOS			
ÓXIDO	LODO A 600°C	LODO A 800°C	CEMENTO
<i>Na₂O</i>	0,606%	0,615%	12,223%
<i>MgO</i>	1,473%	1,453%	0,977%
<i>Al₂O₃</i>	20,816%	21,007%	0,829%
<i>SiO₂</i>	60,655%	60,410%	28,277%
<i>P₂O₅</i>	0,274%	0,272%	0,420%
<i>SO₃</i>	0,245%	0,230%	3,685%
<i>K₂O</i>	2,321%	2,305%	0,925%
<i>CaO</i>	1,435%	1,550%	59,188%
<i>TiO₂</i>	0,918%	0,912%	0,395%
<i>MnO</i>	0,169%	0,169%	1,087%
<i>Fe₂O₃</i>	10,965%	10,956%	3,961%
<i>SrO</i>	0,025%	0,025%	0,103%
<i>BaO</i>	0,098%	0,097%	0,030%

Nota: Promedio del contenido de óxidos de las muestras experimentales, adaptado de Excel.

B. DESVIACION ESTANDAR			
OXIDO	LODO A 600°C	LODO A 800°C	CEMENTO
<i>Na₂O</i>	0,019%	0,019%	1,730%
<i>MgO</i>	0,008%	0,006%	0,005%
<i>Al₂O₃</i>	0,124%	0,097%	0,031%
<i>SiO₂</i>	0,046%	0,073%	0,047%
<i>P₂O₅</i>	0,004%	0,004%	0,006%
<i>SO₃</i>	0,004%	0,011%	0,020%
<i>K₂O</i>	0,018%	0,011%	0,004%
<i>CaO</i>	0,018%	0,039%	0,038%
<i>TiO₂</i>	0,007%	0,005%	0,005%
<i>MnO</i>	0,002%	0,002%	0,002%
<i>Fe₂O₃</i>	0,074%	0,063%	0,004%
<i>SrO</i>	0,000%	0,000%	0,000%
<i>BaO</i>	0,002%	0,002%	0,003%

Nota: Desviación estándar del contenido de óxidos de las muestras experimentales, adaptado de Excel.

5.2. Pruebas estadísticas y discusión

De los resultados obtenidos en los ensayos de FRX para las muestras de lodo cenizado a 600°C y a 800°C junto con el ensayo de FRX del cemento ,se tomaron los grupos de datos de Oxido de Silicio (SiO₂), Oxido de Aluminio (Al₂O₃), Óxido de Hierro (Fe₂O₃), Oxido de Magnesio (MgO) y Oxido de Calcio (CaO) para realizar el análisis estadístico, puesto que son óxidos análogos entre las muestras, estos se

encuentran parametrizados por la NTC 321 para los diferentes tipos de cemento Portland (Figura 5).

Figura 5.

	Tipo 1	Tipo 1M	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4a)	Tipo 5a)
Dióxido de silicio (SiO_2), mín %	-	-	21,0	-	-	-
Óxido de aluminio (Al_2O_3), máx %	-	-	6,0	-	-	-
Óxido de hierro (Fe_2O_3), máx %	-	-	6,0	-	6,5	-
Óxido de magnesio (MgO), máx %	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
Trióxido de azufre (SO_3), máx %	3,5	3,5	-	4,5	-	-
Pérdida al fuego, máx %	-	5,0	4,0	4,0	3,5	4,0
Residuo insoluble, máx %	-	4,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Silicio tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) ^{b)} , máx %	-	-	-	-	35,0	-
Silicato dicálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) ^{b)} , mín %	-	-	-	-	40,0	-
Aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) ^{b)} , máx %	-	-	8,0	15,0 ^{d)}	7,0	5,0
($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) + ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), máx %	-	-	58,0 ^{d)}	-	-	-
Ferrialuminato tetracálcico más el doble de aluminato tricálcico ^{b)} ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) + 2 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), o solución sólida ($4\text{C}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ + 2 $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) el que es aplicable, máx %	-	-	-	-	-	20,0

Nota: Requisitos químicos del cemento Portland según NTC 321

Inicialmente se evalúa el comportamiento de los datos por lo que se realizó el Test de normalidad Shapiro–Wilk en el software SPSS, que parte de la hipótesis nula (H_0) de que “los datos se encuentran normalmente distribuidos” y la Hipótesis Alternativa (H_1) donde “los datos no se encuentran normalmente distribuidos” para cada una de las muestras, con una confiabilidad del 95%.

Se encontró en los resultados del Test, para la muestra de lodo cenizado a 600°C (Figura 5) que no se cumple el supuesto de normalidad debido a que el estadístico de prueba (Sig.) dio mayor 0,05 en casi todos los componentes, es por esto que se rechaza H_0 aceptándose H_1 , ya que los datos no se distribuyen normalmente.

Figura 6.

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
SiO ₂	,097	30	,200 [*]	,968	30	,489
Al ₂ O ₃	,144	30	,117	,911	30	,016
Fe ₂ O ₃	,124	30	,200 [*]	,963	30	,374
MgO	,081	30	,200 [*]	,966	30	,425
CaO	,090	30	,200 [*]	,973	30	,615
SO ₃	,126	30	,200 [*]	,928	30	,044
*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.						
a. Corrección de significación de Lilliefors						

Nota: Resultados del Test de Normalidad Shapiro–Wilk para la muestra de lodo cenizado a 600°C.

Adaptado de SPSS.

Así mismo para la muestra de lodo cenizado a 800°C (Figura 7), no se cumple el supuesto de normalidad debido a que el estadístico de prueba (Sig.) dio mayor 0,05 en casi todos los óxidos, rechazándose así H_0 y aceptándose H_1 , ya que los datos no se encuentran normalmente distribuidos.

Figura 7.

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
SiO ₂	,169	30	,028	,945	30	,123
Fe ₂ O ₃	,186	30	,010	,942	30	,101
Al ₂ O ₃	,127	30	,200 [*]	,950	30	,169
MgO	,090	30	,200 [*]	,968	30	,487
CaO	,138	30	,150	,951	30	,181
SO ₃	,131	30	,197	,929	30	,047
*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.						
a. Corrección de significación de Lilliefors						

Nota: Resultados del Test de Normalidad Shapiro–Wilk para la muestra de lodo cenizado a 800°C.

Adaptado de SPSS.

Para el cemento (Figura 8), no se cumple el supuesto de normalidad debido a que el estadístico de prueba (Sig.) dio mayor que 0,05 en casi todos los óxidos, rechazándose así H_0 y aceptándose H_1 , ya que los datos no se encuentran normalmente distribuidos.

Figura 8.

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
SiO ₂	,083	30	,200 [*]	,965	30	,405
Fe ₂ O ₃	,081	30	,200 [*]	,986	30	,955
Al ₂ O ₃	,120	30	,200 [*]	,958	30	,273
MgO	,107	30	,200 [*]	,966	30	,445
CaO	,083	30	,200 [*]	,965	30	,414
SO ₃	,167	30	,033	,921	30	,029
*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.						
a. Corrección de significación de Lilliefors						

Nota: Resultados del Test de Normalidad Shapiro–Wilk para el cemento Adaptado de SPSS.

De acuerdo a lo anterior los resultados de ninguna de las tres muestras que se analizaron presenta una tendencia normal en la distribución de sus datos, es por esto que se procede a realizar la prueba no paramétrica técnica Kruskal – Wallis comparando las medianas, implementando el análisis de varianza o ANOVA (siglas en inglés) haciendo uso del software estadístico STATGRAPHICS Centurion, el cual se sustenta con la gráfica de caja y bigote que permite observar el comportamiento de medianas.

En la primera prueba se evaluó la concentración del Óxido de Silicio, de la que se observa una substancial diferencia entre las muestras para Valor $P=0$ (tabla 2).

Tabla 2.

Resultados prueba de Kruskal-Wallis para SiO₂.

Tipo	Tamaño Muestra	Rango Promedio
CEMENTO	30	15,5
L.600°C	30	75,5
L.800°C	30	45,5

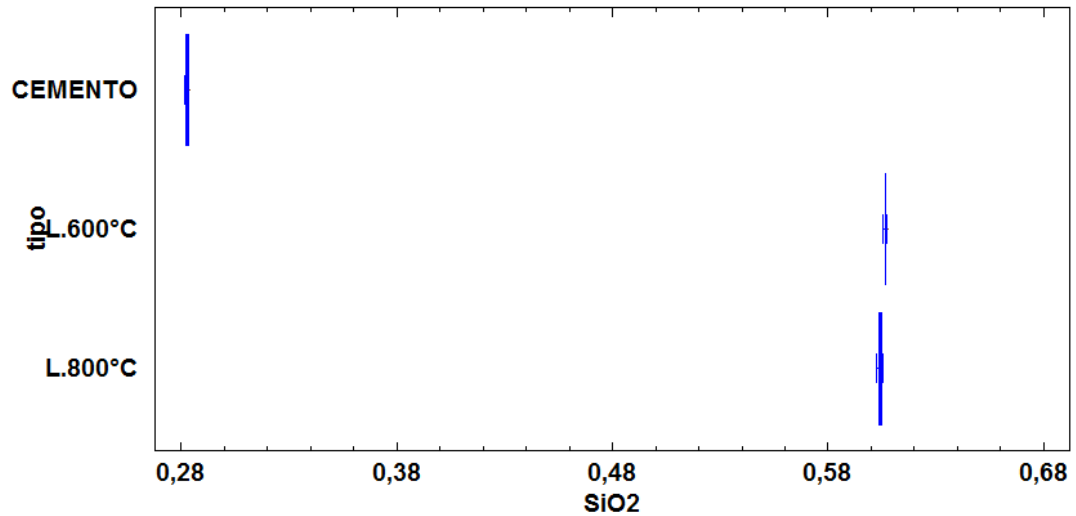
Estadístico = 79,1235 Valor-P = 0

El StatAdvisor

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de SiO₂ dentro de cada uno de los 3 niveles de tipo son iguales. Primero se combinan los datos de todos los niveles y se ordenan de menor a mayor. Luego se calcula el rango (rank) promedio para los datos de cada nivel. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza. Para determinar cuáles medianas son significativamente diferentes de otras, seleccione Gráfico de Caja y Bigotes, de la lista de Opciones Gráficas, y seleccione la opción de muesca de mediana.

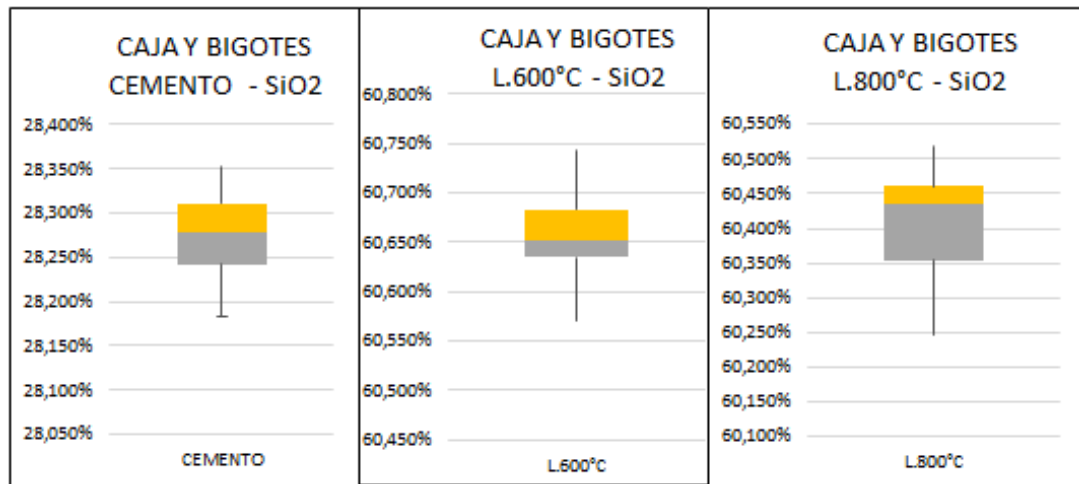
Nota: Adaptado de STATGRAPHICS Centurion.

Figura 9.



Nota: Comparación de graficas de caja y bigotes para SiO₂. Adaptado de STATGRAPHICS Centurion

Figura 10.



Nota: Diagramas de caja y bigotes para el SiO₂ para observar los límites, adaptado de Excel.

En cuanto a la distribución de datos en el diagrama de caja y bigotes se observa que ambos tipos de lodo cenizado poseen mayor cantidad de Óxido de Silicio (Figura 9) en comparación con el cemento. Esto probablemente se debe a que el agua de captación del lodo contiene diferentes sólidos, entre los cuales se puede encontrar altas concentraciones de arcilla y estas presentan altos contenidos de silicatos;

igualmente como en los demás contenidos de óxidos, en la zona de la planta de captación se encuentran diferentes empresas las cuales dentro de sus procesos industriales pueden desear al río cantidades indeterminadas de sílice, este comúnmente es usado en procesos como abrasivo, constituyente de hormigón, fertilizante, aislante, entre otros procesos. La longitud de la caja para cada muestra indica que se presenta poca variabilidad en los datos, a su vez es evidente una asimetría entre las medianas en cada cuartil indicando que los datos no se encuentran normalmente distribuidos tanto para los lodos como para el cemento (Figura 10). En la segunda prueba se evaluó la concentración del Óxido de Aluminio, en esta, se observa una diferencia representativa entre las muestras para Valor $P = 0$ (tabla 3).

Tabla 3.

Resultados prueba de Kruskal-Wallis para Al_2O_3 .

Tipo	Tamaño Muestra	Rango Promedio
CEMENTO	30	15,5
L.600°C	30	48,45
L.800°C	30	72,55

Estadístico = 72,1081 Valor-P = 0

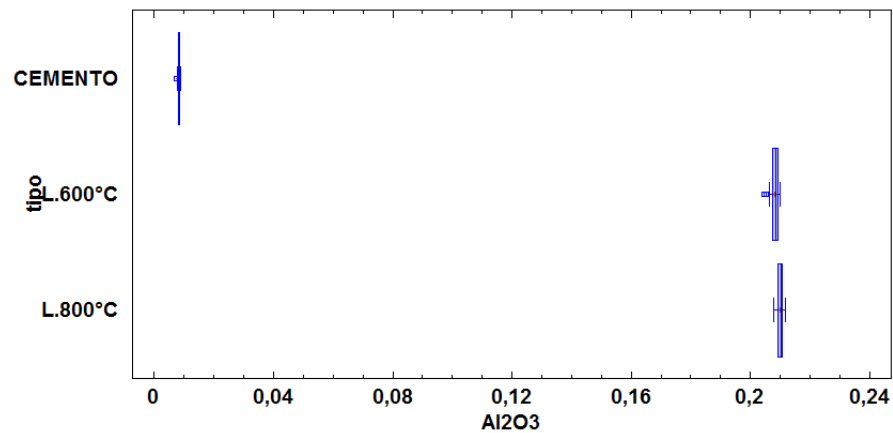
El StatAdvisor

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de SiO_2 dentro de cada uno de los 3 niveles de tipo son iguales. Primero se combinan los datos de todos los niveles y se ordenan de menor a mayor. Luego se calcula el rango (rank) promedio para los datos de cada nivel. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel

del 95,0% de confianza. Para determinar cuáles medianas son significativamente diferentes de otras, seleccione Gráfico de Caja y Bigotes, de la lista de Opciones Gráficas, y seleccione la opción de muesca de mediana.

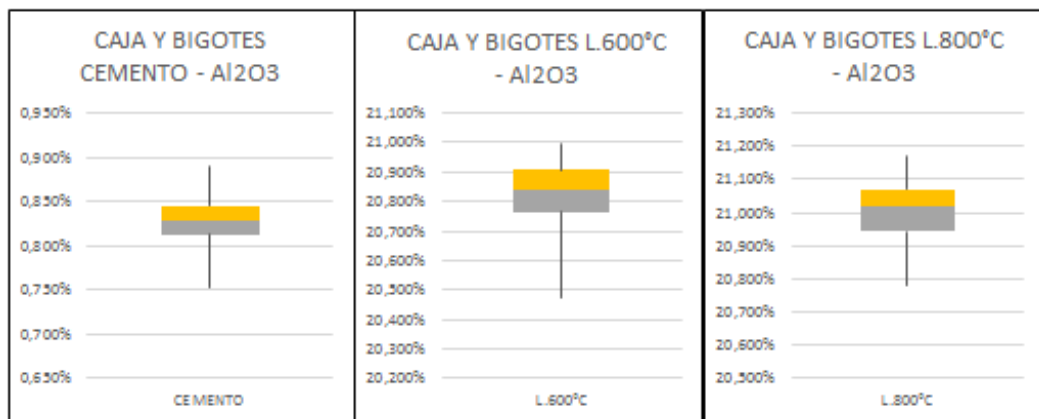
Nota: Adaptado de STATGRAPHICS Centurion.

Figura 11.



Nota: Comparación de graficas de caja y bigotes para Al_2O_3 . Adaptado de STATGRAPHICS Centurion.

Figura 12.



Nota: Diagramas de caja y bigotes para el Al_2O_3 observar los límites, adaptado de Excel.

En el diagrama de caja y bigotes se observa que ambas muestras de lodo cenizado poseen mayor cantidad de Oxido de Aluminio (Figura 11) en comparación con el cemento. Esto debido en gran medida por el proceso de potabilización del agua, puesto que en dicho proceso se utiliza un coagulante (policloruro de aluminio), el cual es aplicado en diferentes cantidades dependiendo de la calidad del agua captada. La longitud de las cajas son cortas lo que indica poca variabilidad en los datos, se presenta asimetría entre las medianas de los cuartiles indicando que los datos no se encuentran normalmente distribuidos tanto para los lodos como para el cemento (Figura 12). El diagrama también muestra algunos de datos atípicos para las muestras.

En la tercera prueba se evaluó la concentración del Óxido de Hierro, esta prueba también hace evidente la diferencia representativa entre las muestras para Valor $P=0$ (tabla 4).

Tabla 4.

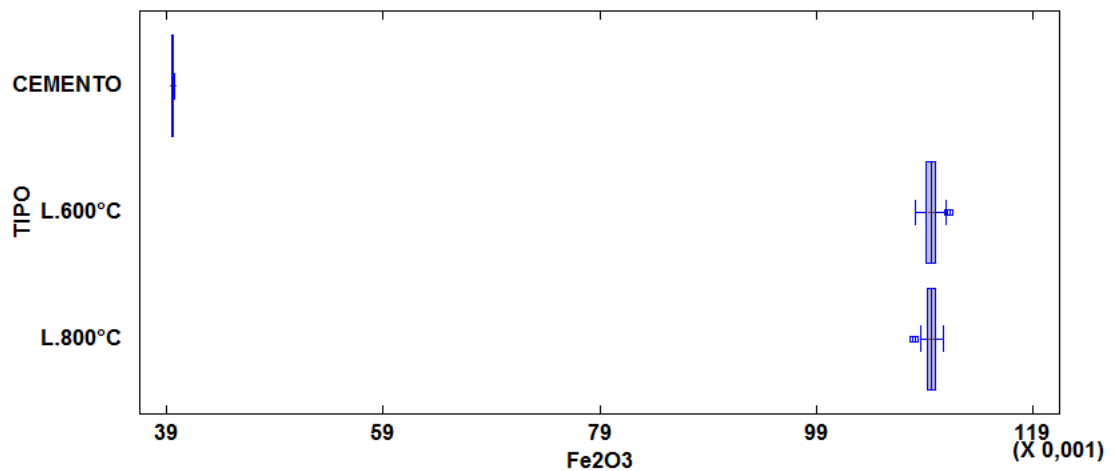
Resultados prueba de Kruskal-Wallis para Fe_2O_3 .

TIPO	Tamaño Muestra	Rango Promedio
CEMENTO	30	15,5
L.600°C	30	60,5
L.800°C	30	60,5
Estadístico = 59,3729 Valor-P = 0		
El StatAdvisor		

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de Fe_2O_3 dentro de cada uno de los 3 niveles de TIPO son iguales. Primero se combinan los datos de todos los niveles y se ordenan de menor a mayor. Luego se calcula el rango (rank) promedio para los datos de cada nivel. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza. Para determinar cuáles medianas son significativamente diferentes de otras, seleccione Gráfico de Caja y Bigotes, de la lista de Opciones Gráficas, y seleccione la opción de muesca de mediana.

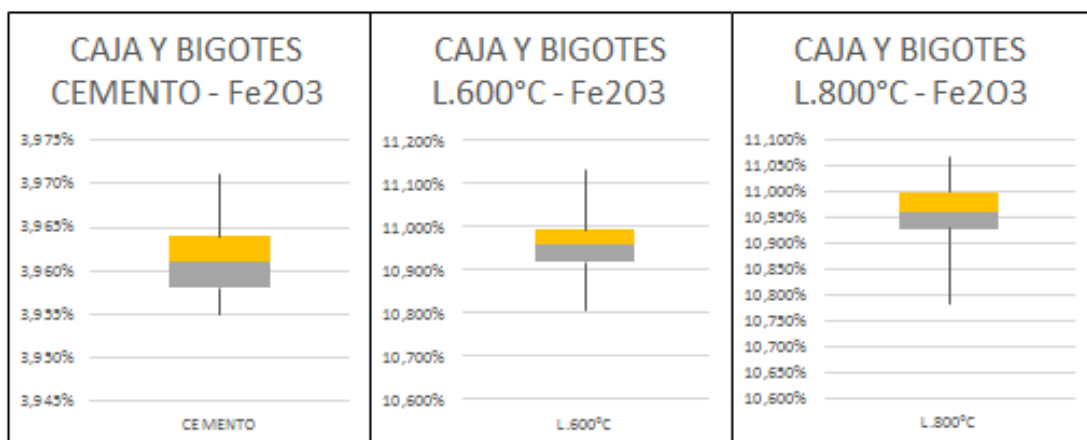
Nota: Adaptado de STATGRAPHICS Centurion.

Figura 13.



Nota: Comparación de graficas de caja y bigotes para Fe_2O_3 . Adaptado de STATGRAPHICS Centurion.

Figura 14.



Nota: Diagramas de caja y bigotes para el Fe_2O_3 para observar los límites, adaptado de Excel.

Se observa en el diagrama de caja y bigotes que los tipos de lodo cenizado se componen de mayor cantidad de Óxido de Hierro (Figura 13) con relación al cemento, lo cual al igual que el óxido de silicio puede deberse a los sólidos suspendidos, que en su gran mayoría son arcillas, las cuales contienen minerales ferromagnesianos, por otra parte, las industrias cercanas al lugar de captación pueden estar desechando al río cantidades considerables de minerales de hierro, tales como la elaboración de materiales en acero, varillas, etc. El diagrama también muestra algunos de datos atípicos para las muestras. La variabilidad entre los datos de las muestras de lodo cenizados es mayor que la del cemento, ya que sus cajas son más largas. Así mismo se distingue asimetría entre las medianas de los cuartiles indicando que los datos no se encuentran normalmente distribuidos en cada tipo de muestra (Figura 14).

En la cuarta prueba se evaluó la concentración del Óxido de Magnesio, en esta prueba también se observa una diferencia representativa entre las muestras para Valor $P=0$ (tabla 5.).

Tabla 5.

Resultados prueba de Kruskal-Wallis para MgO.

TIPO	Tamaño Muestra	Rango Promedio
CEMENTO	30	15,5
L.600°C	30	74,6333
L.800°C	30	46,3667

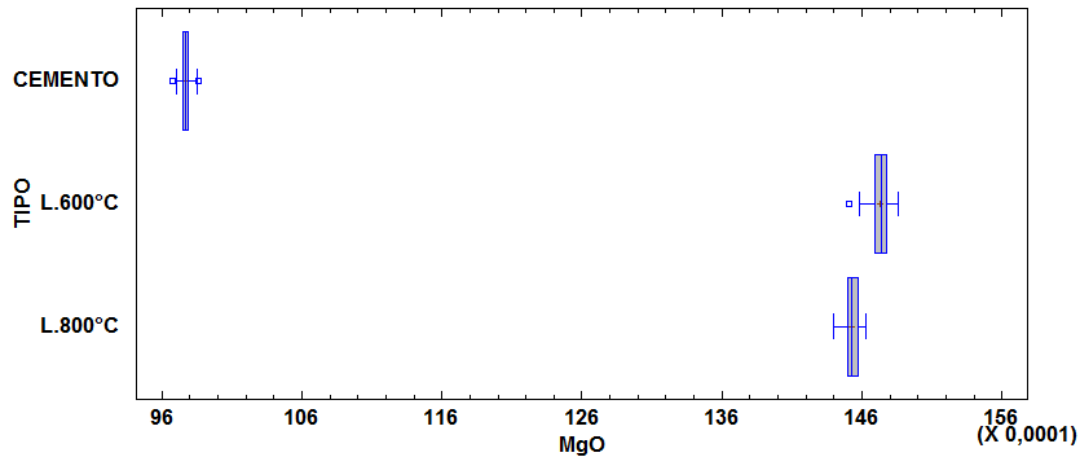
Estadístico = 76,9424 Valor-P = 0

El StatAdvisor

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de MgO dentro de cada uno de los 3 niveles de TIPO son iguales. Primero se combinan los datos de todos los niveles y se ordenan de menor a mayor. Luego se calcula el rango (rank) promedio para los datos de cada nivel. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza. Para determinar cuáles medianas son significativamente diferentes de otras, seleccione Gráfico de Caja y Bigotes, de la lista de Opciones Gráficas, y seleccione la opción de muesca de mediana.

Nota: Adaptado de STATGRAPHICS Centurion.

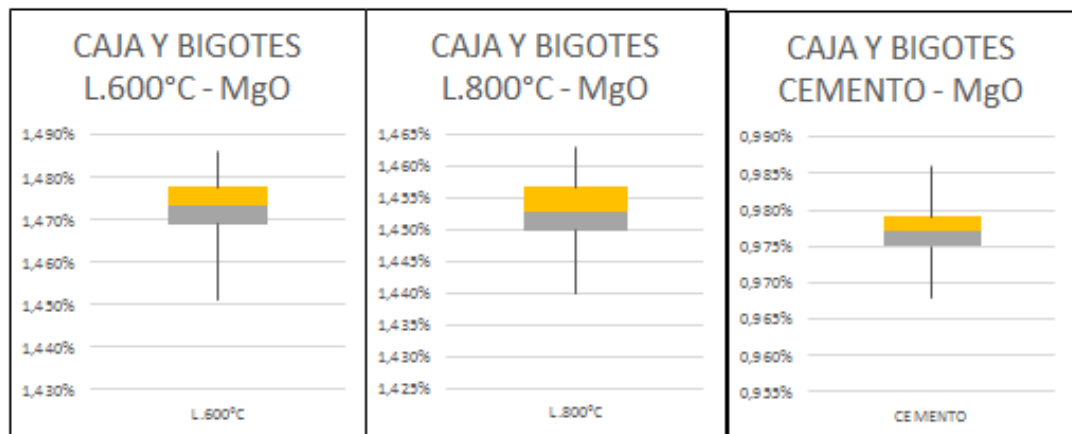
Figura 15



Nota: Comparación de graficas de caja y bigotes para MgO. Adaptado de STATGRAPHICS

Centurion

Figura 16



Nota: Diagramas de caja y bigotes para el MgO para observar los límites, adaptado de Excel.

Del diagrama de caja y bigotes se infiere que los lodos cenizados contienen mayor cantidad de Oxido de Magnesio (Figura 15) En comparación con el cemento, lo cual puede deberse a los desechos de las industrias cercanas cuyos procesos utilicen magnesio y también por la composición de las arcillas por la presencia de los minerales ferromagnesianos, sin embargo, es importante mencionar que las

cantidades de óxido de magnesio son relativamente bajas. Se observan datos atípicos para las muestras. La variabilidad entre los datos del cemento es menor que la de los lodos cenizados, ya que su caja es más corta y se presenta asimetría entre las medianas de los cuartiles mostrando que los datos no se encuentran normalmente distribuidos en cada tipo de muestra (Figura 16).

En la quinta prueba se evaluó la concentración del Óxido de Calcio, en esta prueba también se observa una diferencia representativa entre las medias de las muestras para Valor $P=0$ (tabla 6).

Tabla 6.

Resultados prueba de Kruskal-Wallis para CaO.

TIPO	Tamaño Muestra	Rango Promedio
CEMENTO	30	75,5
L.600°C	30	15,5
L.800°C	30	45,5

Estadístico = 79,1274 Valor-P = 0

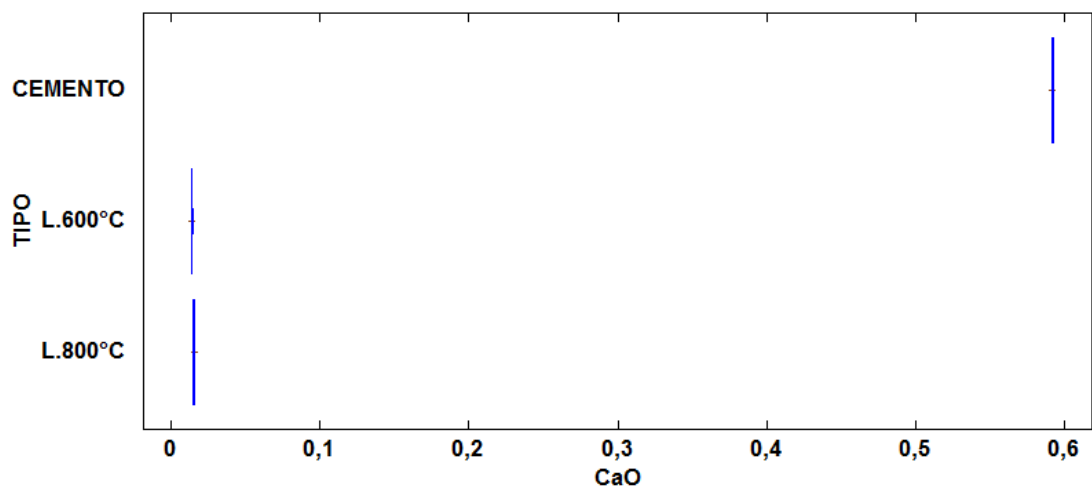
El StatAdvisor

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de CaO dentro de cada uno de los 3 niveles de TIPO son iguales. Primero se combinan los datos de todos los niveles y se ordenan de menor a mayor. Luego se calcula el rango (rank) promedio para los datos de cada nivel. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza. Para determinar cuáles medianas son significativamente diferentes de otras, seleccione Gráfico de Caja y Bigotes, de la lista de Opciones

TIPO	Tamaño Muestra	Rango Promedio
Gráficas, y seleccione la opción de muesca de mediana.		

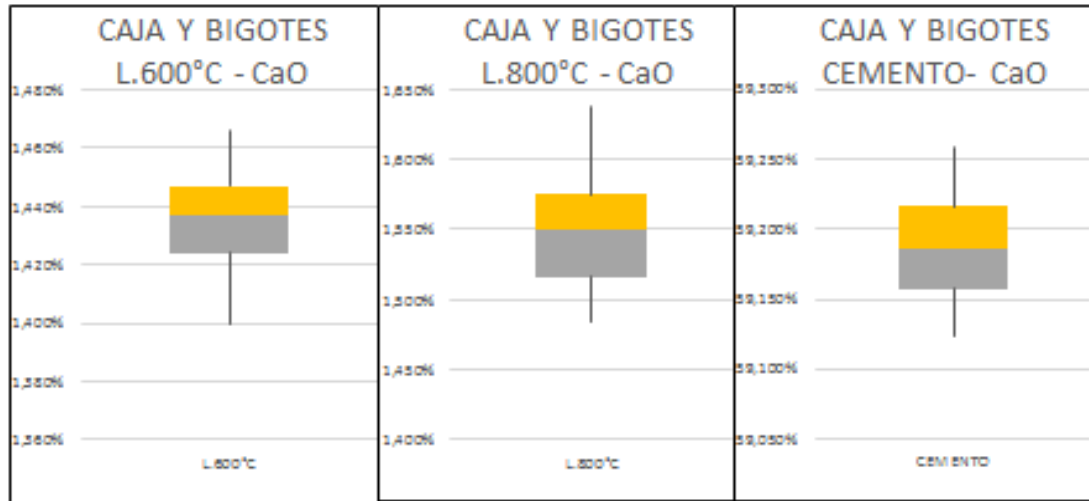
Nota: Adaptado de STATGRAPHICS Centurion

Figura 17



Nota: Gráfica caja y bigotes para CaO (tomado de STATGRAPHICS Centurión).

Figura 18.



Nota: Diagramas de caja y bigotes para el CaO para observar los límites, adaptado de Excel

En el diagrama de caja y bigotes se observa que los tipos de lodo cenizado se componen de menor cantidad de Óxido de calcio (Figura 17) con relación al cemento. El porcentaje de óxido de calcio en general para ambos lodos cenizados a diferentes temperaturas es el más grande en relación a los óxidos presentados anteriormente, su presencia puede deberse al Cal utilizado para remover la dureza del agua captada, durante el proceso de potabilización de agua. La variabilidad entre los datos de cada tipo es poca, ya que sus cajas son cortas. Así mismo se distingue asimetría entre las medianas de los cuartiles indicando que los datos no se encuentran normalmente distribuidos en cada tipo de muestra (Figura 18).

En la sexta prueba se evaluó la concentración del Óxido de azufre, en esta prueba también se observa una diferencia representativa entre las medias de las muestras para Valor $P=0$ (tabla 7).

Tabla 7.

Resultados prueba de Kruskal-Wallis para SO₂.

TIPO	Tamaño Muestra	Rango Promedio
CEMENTO	30	75,5
L.600°C	30	43,4667
L.800°C	30	17,5333

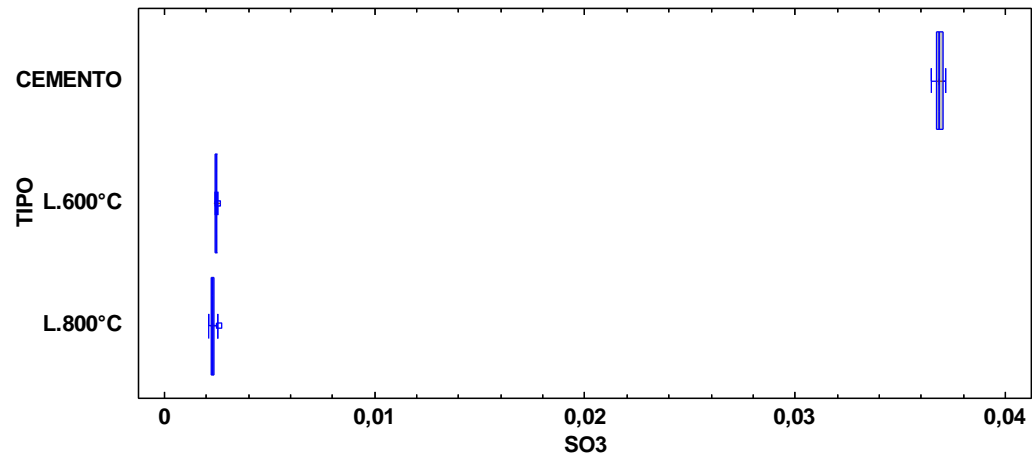
Estadístico = 74,1797 Valor-P = 0

El StatAdvisor

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de SO₃ dentro de cada uno de los 3 niveles de TIPO son iguales. Primero se combinan los datos de todos los niveles y se ordenan de menor a mayor. Luego se calcula el rango (rank) promedio para los datos de cada nivel. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza. Para determinar cuáles medianas son significativamente diferentes de otras, seleccione Gráfico de Caja y Bigotes, de la lista de Opciones Gráficas, y seleccione la opción de muesca de mediana.

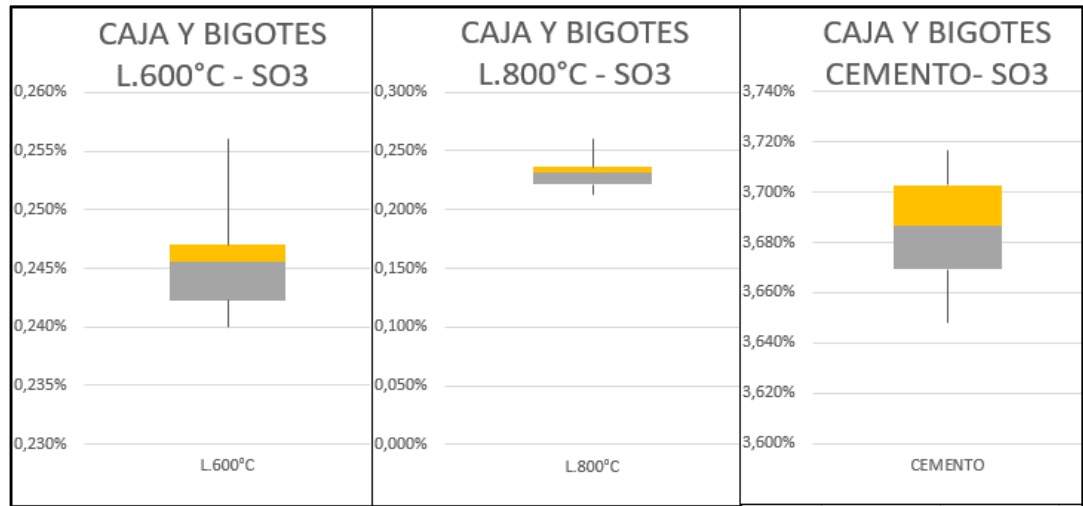
Nota: Adaptado de STATGRAPHICS Centurion

Figura 19.



Nota: Comparación de graficas de caja y bigotes para SO_3 . Adaptado de STATGRAPHICS Centurion.

Figura 20.



Nota: Diagramas de caja y bigotes para el SO_3 para observar los límites, adaptado de Excel.

En el diagrama de caja y bigotes se observa que los tipos de lodo cenizado se componen de menor cantidad de Óxido de azufre (Figura 18.) con relación al cemento. El porcentaje de óxido de azufre en general para ambos lodos cenizados a diferentes temperaturas es el más pequeño en relación a los óxidos presentados anteriormente. La variabilidad entre los datos de cada tipo es poca, ya que sus cajas

son cortas. Así mismo se distingue asimetría entre las medianas de los cuartiles indicando que los datos no se encuentran normalmente distribuidos en cada tipo de muestra (Figura 19.).

Se pudo determinar que los óxidos presentes en los lodos cenizados a 600°C y 800°C en relación al cemento Portland tipo I, no tienen un comportamiento normal, con base a ello se realizó una prueba no paramétrica por el método de Kruskal Wallis, esta prueba permitió analizar y comparar los diagramas de caja y bigote entre cada uno de los seis óxidos que se encuentran en relación al cemento portland tipo I, cabe recordar que los óxidos parametrizados por la norma sin el dióxido de silicio, óxido de aluminio, óxido de hierro, óxido de calcio, óxido de magnesio y trióxido de azufre, siendo estos dos últimos para el cemento tipo I, parametrizados con un máximo de 7.0% y 3.5% respectivamente, estos valores en relación a los obtenidos en el ensayo de FRX se obtiene que:

- ✓ Para el óxido de magnesio en las cenizas de lodo a 600°C y 800°C se obtuvo un máximo de 1.486% y 1.463% respectivamente, cumpliendo con la parametrización de la norma (máximo 7.0%).
- ✓ Para el trióxido de azufre en las cenizas de lodo a 600°C y 800°C se obtuvo un máximo de 0.256% y 0.260% respectivamente, cumpliendo con la parametrización de la norma (máximo 3.5%).

Por otra parte, para el caso del óxido de silicio, hay un mayor contenido presente en el lodo cenizado a 600°C, con un valor máximo del 61,97 %, y 61.83 % para el lodo cenizado a 800°C, esta disminución de contenido es debido a que al aumentar la temperatura parte del oxígeno se enlaza con el fósforo. En relación al cemento cuyo

valor máximo obtenido fue de 28.471%, el óxido de silicio permite incrementar el tiempo de manejo del material cementante. Por otra parte, para el óxido de aluminio se observó un aumento de contenido de 0.135% al aumentarse la temperatura, donde a mayor contenido de este óxido fortalece el endurecimiento del material, el óxido de aluminio se comporta como ácido que permite la reacción entre los componentes del cemento. En óxido de hierro se encontraron valores máximos de 11.106% y 11.103% para las cenizas de lodo a 600°C y 800°C respectivamente, donde se nota que no hay variabilidad considerable en los datos al aumentarse la temperatura, la función principal de este óxido brinda la pigmentación al cemento. En el óxido de magnesio se encontró una cercanía entre los valores, cuyos valores máximos fueron de 1.491%, 1.467% y 0.985% para las cenizas de lodo a 400°, a 600° y del cemento respectivamente, que al igual que el óxido de hierro, no se presenta una variación considerable entre los datos al aumentarse la temperatura, el magnesio presenta sus mayores beneficios en los procesos de la elaboración del cemento, sin embargo, estructuralmente se desconocen los beneficios que aporta dicho mineral. Por último, para el óxido de calcio se observa que el cemento tuvo un mayor contenido, con un valor máximo de 59.305% en relación al lodo cenizado a 600°C y 800° cuyos valores máximos obtenidos fueron de 1.482% y 1.664% respectivamente; encontrando un déficit de calcio en las cenizas, recordemos que la cal es el principal componente para la elaboración del cemento, que al entrar en trabajo con las altas temperaturas de su elaboración se convierte en óxido de calcio.

Con base en lo anterior, se permite establecer que las cenizas de lodo de PTAP cenizadas a 600°C y 800°C, tienen potencial de ser utilizadas como remplazo parcial para material estructural junto al cemento portland tipo I.

5.2. Datos atípicos e incertidumbre

Para el cálculo de los valores atípicos cabe recordar que se deben encontrar los valores mínimos permitidos y máximos permitidos en un grupo de datos, para ello tenemos las siguientes ecuaciones:

$$\rho_1 = Q_1 - 1.5R_I$$

$$\rho_2 = Q_3 + 1.5R_I$$

$$R_I = Q_3 - Q_1$$

Dónde:

$$\rho_1 = \text{valor mínimo}$$

$$\rho_2 = \text{valor máximo}$$

$$Q_1 = \text{Cuartil uno}$$

$$Q_3 = \text{Cuartil tres}$$

$$R_I = \text{Rango intercuartilico}$$

Tomando como ejemplo el grupo de datos del SiO_2 para el lodo cenizado a 600°C.

Tabla 8.

Contenido de SiO₂ - L600°C

CONTENIDO DE SiO ₂ - L600°C									
0,606	0,606	0,606	0,606	0,605	0,606	0,606	0,606	0,607	0,607
0,606	0,606	0,605	0,605	0,606	0,606	0,606	0,605	0,606	0,607
0,607	0,606	0,606	0,605	0,606	0,606	0,606	0,606	0,606	0,606

Oxido de silicio de los 30 ensayos para la ceniza de lodo a 600°C, suministrado por la empresa

Saybolt de Colombia, adaptado en Excel.

Con un total de treinta datos (N=30). A continuación se calculan los cuartiles uno y tres. Con el uso de Excel se obtienen los valores de cada uno de los cuartiles:

Figura 21.

CUARTILES SiO ₂			
	L.600°C	L.800°C	CEMENTO
V.minimo →	60,571%	60,246%	28,183%
Primer cuartil →	60,635%	60,354%	28,242%
Mediana →	60,651%	60,435%	28,278%
Tercer cuartil →	60,684%	60,461%	28,311%
V.Maximo →	60,744%	60,520%	28,352%

Nota: Resultados estadísticos de cuartiles para el óxido de silicio, utilizando Excel.

Obteniendo así que para el lodo cenizado a 600°C se tiene un cuartil uno delimitado por 60.635% y el cuartil tres delimitado por 60.684%. Una vez identificado los valores de los cuartiles, se calcula el rango intercuartilico:

$$R_I = 60.684\% - 60.635\%$$

$$R_I = 0.049\%$$

Luego se calcula los valores máximos y mínimos,

$$\rho_1 = 60.635\% - 1.5(0.049\%)$$

$$\rho_1 = 60.562\%$$

$$\rho_3 = 60.684\% + 1.5(0.049\%)$$

$$\rho_3 = 60.757\%$$

Por lo tanto, el grupo de N datos para el óxido de silicio debe de estar cada uno comprendido entre 60.562% y 60.757%, caso contrario se considerará un dato atípico, esto sin tener en cuenta la calibración del equipo que se explicará más adelante.

Teniendo los valores máximos y mínimos para nuestros datos de FRX de L600°C, L800°C y del cemento, se procede a encontrar los valores atípicos, cuya totalidad es de 11 datos atípicos. Sin embargo, estos datos no pueden ser descartados, debido a que la procedencia de los datos es por medio un equipo de fluorescencia, por lo cual se debe considerar una incertidumbre, el cual fue suministrado por el laboratorista encargado.

El valor de esta incertidumbre es del -2% para el valor mínimo permitido y +2% para el valor máximo permitido, aplicado por ejemplo para el óxido de calcio del cemento obtenemos:

$$\rho_1 = 0.5907(0.98) = 0.57888$$

$$\rho_1 = 57.888\%$$

$$\rho_3 = 0.59305(1.02) = 0.60491$$

$$\rho_3 = 60.491\%$$

Por lo tanto el valor mínimo y máximo permitido para el óxido de calcio en el cemento es de 57.888% y 60.491% respectivamente. Aplicando de igual forma al resto de datos se obtiene la tabla de valores máximos y mínimos permitidos (tabla 9):

Tabla 9.

Valores máximos y mínimos permitidos con incertidumbre.

VALORES MAXIMOS Y MINIMOS PERMITOS CON INCERTIDUMBRE			
CARACTERISTICA		MIN	MAX
SiO ₂	L.600°C	59,350%	61,972%
	L.800°C	58,990%	61,833%
	CEMENTO	27,576%	28,983%
Al ₂ O ₃	L.600°C	20,136%	21,546%
	L.800°C	20,339%	21,683%
	CEMENTO	0,749%	0,913%
Fe ₂ O ₃	L.600°C	10,588%	11,328%
	L.800°C	10,609%	11,325%
	CEMENTO	3,870%	4,052%
MgO	L.600°C	1,427%	1,521%
	L.800°C	1,411%	1,496%
	CEMENTO	0,950%	1,005%
CaO	L.600°C	1,362%	1,511%
	L.800°C	1,399%	1,697%
	CEMENTO	57,888%	60,491%
SO ₃	L.600°C	0,230%	0,259%
	L.800°C	0,195%	0,263%
	CEMENTO	3,547%	3,828%

Límites máximos y mínimos para cada contenido de óxido con incertidumbre del 2%, adaptado de Excel.

Analizando nuevamente el grupo de datos de los ensayos de FRX en relación a sus respectivos valores mínimos y máximos permitidos no se encontraron datos atípicos en nuestra muestra.

5.3. Eficiencia de los lodos con base seca

Para el cálculo de la eficiencia con base seca, se tomaron los datos obtenidos en el laboratorio de la masa sólida del lodo después del secado de 72 horas y la masa seca luego de pasar por el horno a 600°C y a 800°C. Dichos datos se presentan a continuación:

Tabla 10.

Masa sólida y seca de Lodo a 600°C.

<i>Lodo a 600°C</i>				
<i>Nombre</i>	<i>Recipiente (gr)</i>	<i>Masa sólida (gr)</i>	<i>Masa seca+ r (gr)</i>	<i>Masa seca (gr)</i>
B3	112,4	73,54	177,3	64,9
C2	130,4	173,45	282,94	152,54
A3	125,1	150,72	357,67	232,57
C3	127,25	154,91	263,59	136,34
A4	214,1	155,28	350,5	136,4
C1	129,06	154,8	265,18	136,12

Valor de la masa de los recipientes, masa sólida y masa seca para las cenizas de lodo a 600°C, tomado experimentalmente, adaptado en Excel.

Tabla 11.

Masa sólida y seca de Lodo a 800°C

<i>Nombre</i>	<i>Lodo a 800°C</i>			
	<i>Recipiente</i> <i>(gr)</i>	<i>Masa solida</i> <i>(gr)</i>	<i>Masa seca +</i> <i>r (gr)</i>	<i>Masa seca</i> <i>(gr)</i>
B3	112,42	128,3	178,73	66,31
C2	130,4	157,08	273,44	143,04
A3	225,04	163,96	350,86	125,82
C3	127,24	144,26	264,28	137,04
A4	214,08	144,26	326,08	112
B4	106,85	63,83	162,54	55,69

Valor de la masa de los recipientes, masa sólida y masa seca para las cenizas de lodo a 800°C, tomado experimentalmente, adaptado en Excel.

En el caso de la muestra utilizada para ser cenizada a 600°C, en total fueron tomadas 862.7 gramos de masa solida las cuales fueron repartidas en diferentes recipientes, al final del proceso de cenizado, se obtuvo una masa total de 858.87 gramos, teniendo entonces una eficiencia de:

$$e = \frac{\text{masa seca}}{\text{masa solida}} * 100\%$$

$$e = \frac{862.7g}{858.87g} * 100\%$$

$$e = 99.556\%$$

Por lo tanto la eficiencia en base seca de lodo calcinado a 600°C es de un 99.556% aproximadamente por cada kilogramo de muestra.

Por otra parte, la muestra utilizada para ser cenizada a 600°C, en total fueron tomadas 801.69 gramos de masa solida las cuales igual que en el caso anterior, fueron repartidas en diferentes recipientes, al final del proceso de cenizado, se obtuvo una masa total de 639.9 gramos, teniendo entonces una eficiencia de:

$$e = \frac{\text{masa seca}}{\text{masa solida}} * 100\%$$

$$e = \frac{639.9g}{801.69g} * 100\%$$

$$e = 79.819\%$$

Por lo tanto la eficiencia en base seca de lodo calzinado a 800°C es de un 79.819% aproximadamente por cada kilogramo de muestra. Lo cual nos dice que en general, hay una mayor eficiencia al utilizar las cenizas de lodo a 600°C, puesto que su eficiencia es mayor.

Conclusión

A partir de los resultados obtenidos anteriormente, se puede concluir que:

Se pudo determinar mediante un análisis de fluorescencia de rayos X los valores de óxidos presentes en las cenizas de lodo a 600°C y a 800°C.

Se logró comparar la composición química entre las cenizas de lodo vs el cemento portland tipo I mediante el método de Kruskal Wallis el cual permitió comparar el contenido de óxidos presentes mediante el uso de diagramas de caja y bigotes.

Con base a los datos obtenidos en el laboratorio, se obtiene que las cenizas de lodo cenizadas a 600°C tienen una mayor eficiencia que las cenizas de lodo cenizadas a 800°C cuyos valores son 99.556% y 79.819% respectivamente.

De acuerdo con el análisis químico de las muestras, las cenizas de lodo pueden ser clasificadas como puzolana de clase N según la norma ASTM C618-05. Con base en lo anterior y los resultados obtenidos se recomienda el uso de dichas cenizas como uso parcial (en cantidades porcentuales) como material estructural debido a que el óxido de azufre y el óxido de magnesio cumplen las especificaciones de la norma NTC 321 para el cemento portland tipo I.

Recomendaciones

Con base en esta investigación, se recomienda lo siguiente:

- Realizar un estudio de toxicología a los lodos por la posible presencia de metales pesados desechados en el río Magdalena aguas arriba del punto de captación.
- Evaluar el efecto sobre las propiedades mecánicas en morteros hidráulicos, al utilizar como remplazante parcial del cemento, cenizas de lodos.
- Identificar un residuo compuesto con alto contenido de calcio para aumentar el porcentaje de óxido de calcio importante en los materiales cementantes.

6. Bibliografía

- [1] ASTM: ASTM C109/C109M-12, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).
- [2] Bermeo, A. & Idrovo E. «Aprovechamiento de lodos deshidratados generados en plantas de tratamiento de agua potable y residual como agregado para materiales de construcción», Cuenca, Ecuador, 2014. (Trabajo de pregrado). Universidad de Cuenca. Facultad de Ingeniería.
- [3] Blanco F. «LECCION 4. CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS. TIPOS» Universidad de Oviedo, 2013.
- [4] C. Barrera-Díaz, G. Martínez-Barrera, O. Gencel, L. Bernal-Martínez y W. Brostow, «Processed wastewater sludge for improvement of mechanical properties of concretes», Journal of Hazardous Materials, vol. 192, no. 1, pp. 108-115, 2011.
- [5] Camargo L, Alvarez J y Guzman A., «Materiales de construcción a base de lodos residuales» Universidad del Norte, 2012.
- [6] Casero Rodriguez, D. «Módulo IV: Abastecimientos y Saneamientos Urbanos», eoi Escuela de Negocios 2008.
- [7] Cepis. «Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua: manual de capacitación para operadores.», Lima, Perú, 2002.
- [8] COMISIÓN EUROPEA «Prevención y Control Integrados de la Contaminación» DIRECCIÓN GENERAL CCI, 2011.
- [9] comité Organizador de LATINOSAN 2007 “«Saneamiento para el desarrollo», Conferencia Latinoamericana de Saneamiento, 2007.

- [10] F. C. Chang, J. D. Lin, C. C. Tsai and K. S. Wang «Study on cement mortar and concrete made with sewage sludge ash» Water Science & Technology.2010
- [11] Falkenberg, K. «Proteger al medio ambiente de los vertidos de aguas residuales» European Union, 2010
- [12] Gallo, J.A, Uribe, J.C, «Reutilización de Lodos de planta de Potabilización en el Tratamiento de Aguas Residuales», Manizales, Colombia, 2003. (Trabajo de pregrado), Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
- [13] Idrovo C., «Resumen» Universidad de Cuenca, 2010
- [14] K. Archaneswar, Dr. K. Rajasekhar & Dr. C. Sashidhar, «Utilización de cemento incorporado con lodos de tratamiento de agua» ISP 2016
- [15] L. Sandoval Y., A. Martín D., M. Piña S. y L. Montellano P., «Estudio piloto para reducir el volumen de lodos en plantas potabilizadoras», Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Morelos, México, 2002.
- [16] Latorre Cañón, A. «La industria del cemento en Colombia determinantes y comportamiento de la demanda » Pontificia Universidad Javeriana, 2008
- [17] Lin, Y, S. Zhou, F. Li y Y. Lin, «Utilization of municipal sewage sludge as additives for the production of eco-cement», Journal of Hazardous Materials, Vols. 1 de 2213-214, pp. 457-465, 2012.
- [18] M. Pérez, F. Baeza, P. Garcés, O. Galao y J. Payá, «Uso potencial de ceniza de lodo de depuradora como sustitución de árido fino en bloques de hormigón prefabricados», DYNA, vol. 80, nº 179, pp. 142-150, 2013.

- [19] M.Y. Nurul Nazierah, K. Kartini, M.S. Hamidah and T. Nuraini. «Compressive Strength and Water Absorption of Sewage Sludge Ash(SSA) Mortar »,InCIEC 2015,
- [20] Ministerio de Desarrollo Económico, Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS – 2000. Sección II, Título C, sistemas de potabilización.
- [21] Nuria Husillos Rodríguez «Valorización de residuos de estaciones de tratamiento de agua potable y residual en la industria del cemento» Universidad Autónoma de Madrid 2012.
- [22] O. M. Astreewa « Influencia de la cocción y enfriamiento del clinker de cemento portland sobre su estructura Térmica », Vol. 22 No. 4 Pag. 21, 1956
- [23] P. Torres, D. Hernández y D. Paredes, «Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos», Ingeniería de Construcción, vol. 27, nº 3, pp. 145-154, 2012.
- [24] Perilla Sastoque, J. « Estrategias para el reúso de los lodos en la zona dos de la Empresa de Acueducto y alcantarillado de Bogotá y plantas de tratamiento de aguas potables y residuales.» UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA, 2005
- [25] Raigosa, M. «Evaluación de alternativas para el manejo de lodos provenientes de las plantas de potabilización de agua de los municipios del departamento de Risaralda mediante el análisis costo-beneficios», Pereira, Colombia, 2012. (Trabajo de pregrado). Universidad tecnológica de Pereira. Facultad de Ciencias Ambientales.
- [26] RAS 2000, Título A, Ministerio de Desarrollo Económico, Noviembre 2000

- [27] Sandoval, L., Motellano, L., Martín, A., Sánchez, L., Santana, M. & Morán, M. «TRATABILIDAD DE LOS LODOS PRODUCIDOS EN LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA», Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- [28] Sanjuán Barbudo, M. y Chinchón Yepes, S. «INTRODUCCIÓN A LA FABRICACIÓN Y NORMALIZACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND» PUBLICACIONES DE LA UNIVERSIDAD DE ALICANTE, 2014.
- [29] T, Taruya, N. Okuno & K. Kanaya «Reutilización de lodos de potabilización como materia prima para cemento portland en Japon» Universidad de Shiga Prefecture 2002
- [30] Y. Avila, A. Guzmán, A. Muñoz y A. Caro, «Influence of variability of parameters of sludge from water purification plants on the mechanical properties of cement mortar», Construction pathology, rehabilitation technology and heritage management, Santander, 2014, p. 146.
- [31] A. Amador, E. Veliz & M. Bataller «Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones», Revista CENIC. Ciencias Químicas, vol. 46, pp. 1-10, La Habana, Cuba, 2015.
- [32] R. Walpole, R. Myers, S. Myers, K. Ye, «Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias», PEARSON EDUCACIÓN, Novena edición, México, pp. Xx-xx, 2012
- [33] Universidad de Barcelona «Manual de SPSS», Cap. 5-6
- [34] I. Moral Peláez, «Comparacion de medias», 2012
<http://www.revistasden.org/files/12-cap%2012.pdf>

- [35] P. Reyes « Distribución normal, prueba de normalidad y transformación de datos», Mexico, 2007
- [36] S. Angelone « Geología y Geotecnia» 2da Edición, Tipos de Suelos: Arcillas, 2007
http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Tipos%20de%20suelos_2007.pdf
- [37] L. De Pablo «Las arcillas.I.clasificación, identificación, usos y especificaciones industriales», Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 1964
<http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca03/2702/de-pablo.pdf>
- [38] R. Lopez Cualla «Elementos de diseño para acueducto y alcantarillado» 2da. Edición, Colombia, 1997, p. 22, 87, 88.
- [39] P. Kisbye «Test de Kolmogorov-Smirnov», FAMAF, Argentina, 2010.
- [40] L. Isaza, E. Acevedo, F. Hernandez «Comparación de pruebas de normalidad», Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2015.
- [41] Practica de Ecología «MÉTODOS DE ANÁLISIS DE DATOS EN ECOLOGÍA» Universidad de Alcalá, curso 2004-2005
- [42] Grupo de innovación educativa «SPSS: Gráficos» Universidad de Valencia, España, 2010